

プラント機器の余寿命評価技術

—腐食余寿命評価—

寿命評価の関心事は①設計段階において目標期間いかに健全性を維持させるかという全寿命の問題と②運転・使用段階において診断により、いま損傷程度はどうか、そしてあとどれ位の寿命があるかという余寿命の問題、の2点である。新設プラントが少なくなっている近年では②への関心とともに適正保全による長寿命化への要望が強い。プラント機器における材料の腐食は材料、環境とも変動要因が多く、その評価結果が非定量的であることが多いため、現実の寿命評価ニーズとの間には大きなギャップがある。最近、腐食現象を確率統計的に取扱うことにより寿命・余寿命予測を行い、このギャップを埋める試みが盛んに行われている。ここでは、腐食余寿命評価技術について、まだ発展途上のものであるが、その現状を紹介する。

材料の腐食と余寿命評価の考え方

A-1

材料と環境の組合せにより腐食の形態はさまざまであるが、水溶液中腐食にかぎって使用期間と腐食深さの関係で腐食のタイプを整理すると第1図のように5つになる。またこれらの代表例を第1表に示す。腐食として問題になるのはB~E型である。まずB型は例に示した鋼の大気腐食のほかにも、高温硝酸中のステンレス鋼の腐食など不動態域での腐食にみられ、材料と環境が決まれば減肉量 δ が時間 t に比例し、 $\delta=kt$ (直線則)の関係で腐食が進展するものである。 t_1 時間運転時の余寿命推定は、その時点での減肉量 δ_{B1} を計測すれば、次式より行うことができる。

$$\text{余寿命}(t_{Bf} - t_1) = (\delta_{AM} - \delta_{B1}) / k_B \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで t_{Bf} : B型腐食の全寿命

δ_{AM} : 設計上許容できる最大減肉量

k_B : 腐食速度定数

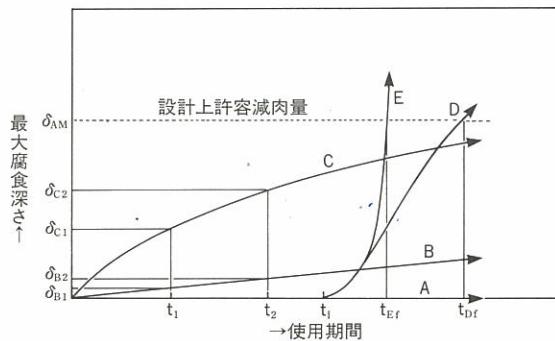
B型にかぎらず余寿命推定は、その時点までの使用条件が以後も継続されるという前提に立っているので、以後の $t_2 \cdots t_n$ 時間後に検査、確認が必要で、差異が生ずれば補正しながら運転することになる。C型およびD型は孔食あるいはすき間腐食タイプであり、腐食は $\delta=k(t-t_1)^n$ (べき乗則)で進展する*。このうちC型は潜伏期間 t_1 が0のケースで、土壤、淡水、海水中における鋼の腐食にみられるように全面腐食と孔食が混在する。余寿命は t_1 時間運転後の最大腐食深さ δ_{c1} と腐食速度則が求まれば、次式より推定することができる。

$$\text{余寿命}(t_{cf} - t_1) = \left(\frac{\delta_{AM} - \delta_{c1}}{k_c} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで t_{cf} : C型腐食の全寿命

k_c, n : 腐食速度定数

しかしながら、現実問題として局部腐食はバラツキが大きく、 t_n 時間後の最大腐食深さ δ_{cn} の測定は簡単ではない。ましてや1、2度の測定で速度則



第1図 腐食進展曲線(模式図)

第1表 第1図の腐食のタイプと代表例

腐食進展の型	腐食形態	代表例(材料/環境の組合せ)
A型	腐食なし～微小均一腐食	ステンレス鋼/屋内大気
B型	均一腐食	鋼/屋外大気
C型	孔食をともなう全面腐食	鋼/土壤、海水、淡水
D型	孔食、すき間腐食	アルミニウム、銅、ステンレス鋼/淡水
E型	(孔食を基点とした)応力腐食割れ 腐食疲労	ステンレス鋼/塩水

を求めるのはさらに難しい。このため、最近ではこの現象を確率的性質と認識し、最大値、最小値を取り扱う極値解析の適用が試みられ、成功例もかなり報告されはじめている。詳細は入門書¹⁾、解説²⁾、マニュアル³⁾に譲るが、極値解析法は材料、環境が同一と考えられる母集団からランダムに抽出されたサンプル個々についてのデータより、母集団全体の最大値あるいは最小値を推定するものである。次節で測定例を示すように、C型の場合、孔食深さの最大値を極値分布の1つであるGumbel分布で解析した例が多い。余寿命はこの最大値($\delta_{c1}, \delta_{c2}, \dots$)の時間変化を求めて速度則を把握し、 $t_{cf} - t_n$ より推定される。このとき、推定値自体の誤差を考慮して $t_{cf} - t_n$ に安全率をかける場合もある。

D型は潜伏期間 t_1 の後、急激な腐食進展が起るもので、ステンレス鋼やチタンなど不動態化能の

* 対数則 $\delta=k \log(t-t_1)$ とする説もあるが、べき乗則の方が安全側

1) 腐食防食協会編「装置材料の寿命予測入門—極値統計の腐食への適用」丸善、(1984)

2) 例えば柴田俊夫:鉄と鋼, Vol.67(1981), p.891

3) 腐食防食協会 60-1 分科会:防食技術, Vol.37(1988), p.768

高い材料の局部腐食に例が多い。 t_i 自体バラツキが大きく、確率的取扱いが必要であるが、一般的には全寿命の大半が潜伏期間である。第1図のごとく、任意の t_1 、 t_2 の時点では余寿命推定に必要な腐食データがえられず、1回／年程度の定期点検頻度では次の定期点検前に t_i が到来して一気に腐食漏洩にいたることもあり、現在のところ適確な余寿命評価技術はない。このようなタイプの腐食の余寿命評価には、腐食の進展過程のmmオーダーの材料寸法の変化を追いかけるのではなく、腐食の発生過程に対応した電位などの電気的信号や、寸法にしても数 $10\mu\text{m}$ 以下の極めて初期の微小変化の計測などにより、欠陥が本格的に成長しはじめる前の兆候をとらえるモニタリング技術あるいは検査技術の開発が必要であるが、課題が多い。

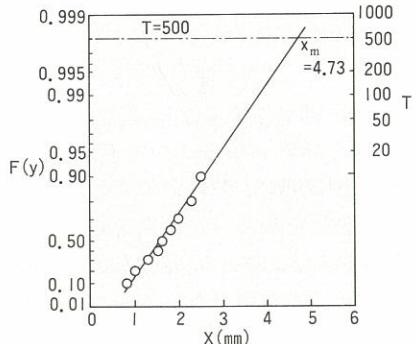
E型は潜伏期間 t_i のあとで応力腐食割れあるいは腐食疲労のケースで、割れの進展とともに割れ先端の応力拡大係数Kがだんだん大きくなるタイプである。厳密にはKがだんだん小さくなる場合やまた $t_i \approx 0$ のタイプのものもあり、これらは腐食進展曲線の形が違うが、前号 [Vol.4, OCT. (1995), p.1] での疲労余寿命評価との重複もあり、ここでは削除した。いずれにしても潜伏期間 t_i の後、急激な腐食進展があり、D型同様、現状、適確な余寿命評価技術はない。以下、腐食余寿命評価として現在検討されている例を述べる。

A - 2

腐食余寿命評価例

診断／極値解析

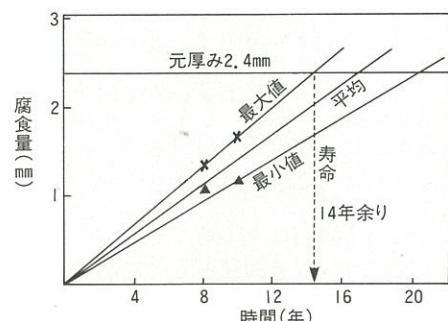
腐食余寿命評価には、まず信頼性のある現状把握が必要である。それもできるだけ非破壊検査で実施することが望ましく、超音波や渦流探傷などの検査技術の発展に負うところが多い。しかし、これら非破壊検査技術にも小口径の孔食や微小き裂の検出能力の不足、あるいは検査速度などの制約もあり、また埋設物など測定不能の場合もある。さらに、大きなプラント機器では、全表面を調べることは实际上不可能でもある。したがって実機からの抜取りサンプルでの非破壊または破壊検査データから全体像を推定する必要がある。数少ないデータからの寿命に関係する腐食最大値の推定法については、すでに腐食防食協会より推奨マニュアル²⁾も出されているので、それにしたがえば推定腐食最大値を算出できる。これにはGumbel確率紙を用いるが、データが二重指數分布にしたがうと直線がえられるように、縦軸左側に累積確率 $F(y)$ を $-\ln \ln(1/F(y))$ の目盛で、横軸に変数 x を算術目盛で、また縦軸右側には再帰期間 T を $F(y)=1-1/T$ の関係で目盛ってある。ここで



第2図 最大孔食深さデータのGumbel確率プロット

$F(y)$ は変数 x を $y=(x-\lambda)/\alpha$ (λ :位置パラメーター、 α :尺度パラメーター)として表した x の累積分布関数である。第2図²⁾は石油タンク底板の土壤側からの孔食のGumbel確率紙へのプロット例である。測定サンプル9枚おのおの最大孔食深さデータから、推定対象全面積の最大値 x_m は再帰期間 T (全面積/サンプル1枚の面積)を使って4.73mmと推定されている。この例では最大値の分布が二重指數分布に合致するので直線性がよいが、データによっては直線性が悪い場合もあり、検定で不適合となればサンプルの数、大きさおよび層別の再検討あるいは別の確率分布への試行が必要となる。このように現状把握としての腐食最大値 x_m が推定できるが、前述のように余寿命推定には別途腐食速度則を把握し、(1)あるいは(2)式の k および n の値を定める必要がある。

このためには使用期間 t_n の n が最低2以上の時点でのデータが必要であり、これらを用いてはじめて余寿命を推定することができる。本来同一プラント機器の同一部位の経過時間の異なるデータが必要であるが、余寿命評価をただちに行いたいという場合には、次善策としてほぼ同一仕様のもので、かつ経過時間の異なる別の機器、部材のデータを合成して速度則を見出す試みがなされてい



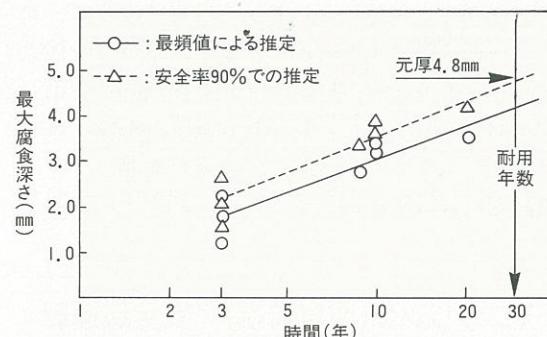
第3図 热交換器チューブの腐食寿命予測

る。以上の事情により現在検討、報告されている事例は、ほぼ同一仕様で、かつ数の多いタンク底板(裏面の土壤腐食)、配管(内面の淡水腐食、スラリー腐食あるいは外面の土壤腐食など)、熱交換器管(内面の冷却水腐食など)の別々の機器データを集めて解析されているものが多い。

第3図⁴⁾は炭素鋼製多管式熱交換器管の余寿命評価例である。調査は同一熱交で8年目と10年目にそれぞれ各パスごとに抜管し、内面の冷却水による腐食減肉量を測定し、その極値推定より余寿命4年と推定された。本熱交では、伝熱性能維持のため毎年管内スケール落しが実施されていることが腐食速度則が直線則になる理由とされている。熱交換器の場合、同一機器内でも温度分布があるのでその層別や、U字管型では平行部と曲げ部を別々に解析する必要があること、などが留意点とされている。

いっぽう、鋼製熱交換器管の余寿命評価の現状について日本材料学会でアンケート調査した結果⁵⁾によると、直線則による評価が多い。このため石油精製会社などでは、抜取りサンプルデータから極値解析なしで(1)式で余寿命推定をする従来からの簡便なMAT法(Minimum Allowance Thickness Method)による評価例も多い。

第4図⁶⁾はコークス炉ガス(COG)炭素鋼配管の余寿命評価例である。調査は同一配管系で使用期間の異なる2つの配管部の一部を切り出し、内面

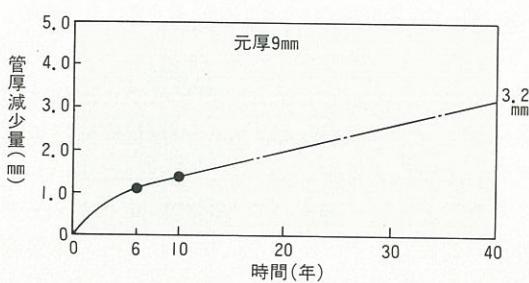


第6図 水車用給排水配管の腐食寿命予測直線

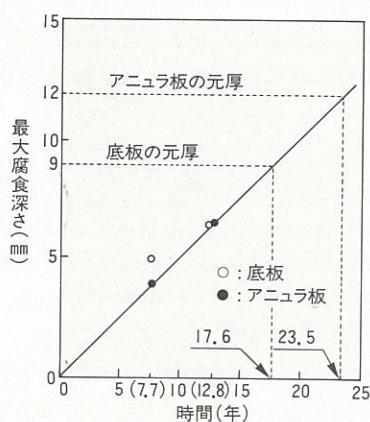
側からの減肉量測定より最大減肉量を推定し、直線則にあてはめて余寿命を推定したもので、少なくとも今後30年は大丈夫と結論している。

第5図⁷⁾は石油タンク底板の余寿命評価例である。調査は使用期間の異なる2基のタンク底板より切り出したサンプルの裏面土壤側からの孔食深さを測定して極値プロットし、推定最大値は時間(年)に対して直線則で近似されるとして余寿命が推定された。タンク底板の最大孔食深さ推定においては、中央部と外周部を分ける、外周部も犬走り部からの雨水侵入を考慮して1サンプルあたりの周長を2m程度にする、溶接部と母材部を分ける、などが必要とされている。

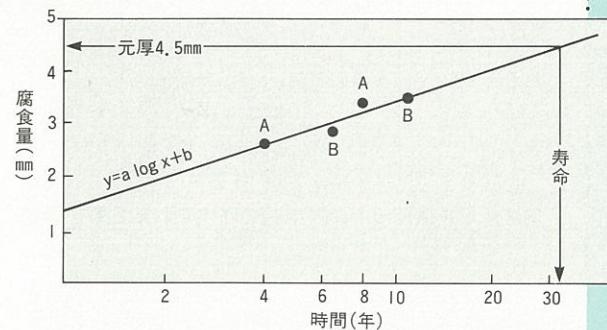
第6図⁸⁾は給排水炭素鋼配管の余寿命評価例である。調査は使用期間の異なる3カ所の配管から切り出したサンプルの内面清浄水による錆こぶの下の孔食に対して行われ、測定した孔食深さの極値解析より推定された最大値は、時間(年)の対数に比例する結果となっている。一方、同一配管でも数m離れると腐食状況が変化するので、設置場所の異なる配管のデータを集めて速度則を見出すことは難しいとの指摘もある⁹⁾。



第4図 COG配管の最大減肉量より推定した寿命予測



第5図 タンク底板最大腐食深さの成長速度



第7図 炭素鋼廃液タンク最大腐食の経年変化

第7図⁴⁾は炭素鋼製廃液タンク胴板の余寿命評価例である。調査は同一仕様のA、B2基のタンクについて、期間をかえて各2回外面から超音波厚み計で減肉量を測定した結果を集計したもので、腐食は対数則に近似でき、余寿命が推定されている。

以上のように、現状では腐食余寿命評価に関し

4) 今川博之：配管技術，Vol.29(1987), p.91

5) 今川博之ほか：材料，Vol.44(1995), p.1344

6) 山本一雄：第58回腐食防食シンポジウム資料(1984), p.14

7) 岩井哲男：第73回腐食防食シンポジウム資料(1988), p.16

8) 石川雄一ほか：防食技術, Vol.29(1980), p.502

9) 正村克身ほか：材料，Vol.36(1987), p.47

- 10) P. Poulsen : Corr. Sci., Vol. 15 (1975), p. 469
 11) 大久保勝夫ほか：防食技術, Vol. 28 (1979), p. 162

てデータの集積が行われている段階であるが、タンク底板や銅合金熱交換器管などすでに全数検査データがあり、その中から逆にランダムに抽出した少数データの解析の仕方による推定極値と真値の差を少なくする方法論の検討も行われている。実務的には機器部位の層別が最も難しく、経験を要する。

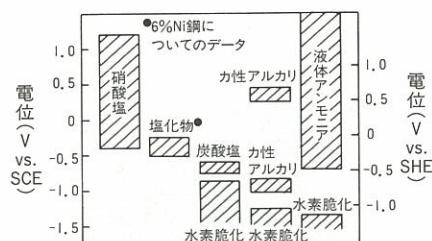
モニタリング(腐食監視)／安全域運転

前述のようにDあるいはE型タイプの局部腐食における余寿命評価技術はまだ確立されていない。実際問題として、座して漏洩事故を待つわけにはいかないので、経験に基づいてDあるいはE型の腐食の危険性のある機器部位については点検頻度をあげる措置がとられている。しかしながら、いまなおプラント機器の腐食事故の大半がこれらのタイプのものであることも現実である。

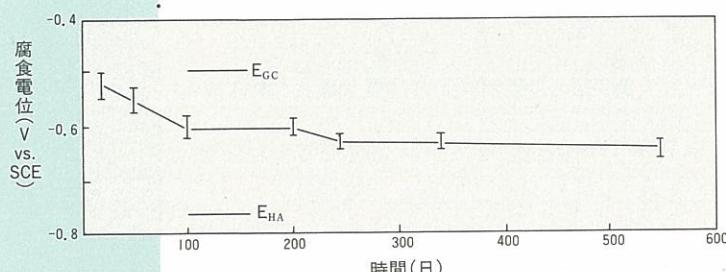
いっぽう、プラント機器の運転中の腐食監視により腐食に対して安全域運転を確保する方法がある。これはいわばC、DあるいはE型腐食をAあるいはB型腐食へ変換させるもので、余寿命はあと何年ではなく、監視に基づいた環境制御で余寿命半永久化をめざす対応技術である。

金属の腐食状態図である電位-pH図には、金属が全く腐食しない不变態域(Immunity Zone)と、腐食生成物の保護作用で腐食が抑制される不働態域(Passivation Zone)があるが、環境制御によりこのどちらかの領域に保持し、安全運転する例は多い。代表例が電気防食により鋼の電位を飽和カロメル電極基準(SCE)-0.77Vより卑にする方法

- 12) 福塚敏夫ほか：火力原子力発電, Vol. 30 (1979), p. 79

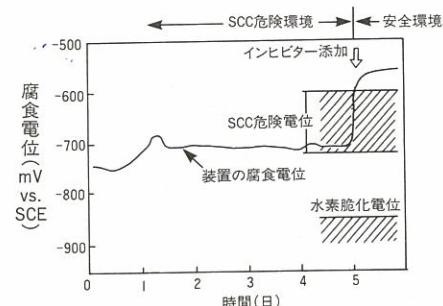


第8図 各種環境での炭素鋼の環境割れ発生電位領域



第10図 復水器のネーバル黄銅管板防食電位の経時変化の例

である。この値は熱力学的根拠が明確であるが、この延長として実験事実からの経験値的臨界条件の把握が進められている。DおよびE型腐食に関するものとして、例えば第8図¹⁰は炭素鋼の環境割れ発生電位領域をまとめたものである。装置材料の腐食電位をあるかぎられた電位領域からはずすことにより、応力腐食割れが発生しなくなる。この実装置への1つの適用例を第9図¹¹に示す。これは炭素鋼製CO₂吸収塔で、装置の腐食電位が応力腐食割れ発生危険域にあったものを環境の酸化力を高めて貴側に保持するようにしたものである。ステンレス鋼についても標準水素電極(SHE)を基準とした腐食電位を-230mVより卑にすることにより、軽水炉水質環境における粒界応力腐食割れを防ぐことができるうことや、すき間腐食再不働態化電位E_{RCREV}より卑にすることにより塩化物水溶液中におけるすき間腐食を防ぐことができるなどから、臨界電位の量化が進められつつある。



第9図 CO₂吸収塔の応力腐食割れと腐食電位測定結果

そのほかの例として第10図¹²を示す。設備は海水冷却タービン復水器で、ネーバル黄銅製管板とチタン伝熱管を併用しており、黄銅のガルバニック腐食とチタンの水素吸収を同時に防ぐカソード防食が必要である。E_{GC}、E_{HA}はそれぞれの臨界電位であり、腐食監視により、安全域運転を図ることができる。

この方法の適用には環境制御が可能なことが前提であるが、実験室的に求めた臨界値自体の信頼性向上や実機における電位測定上の問題など課題もある。

腐食余寿命評価技術の概要を紹介した。現状は実機のデータを集積している段階で、成功例、不成功例があるが、BおよびC型腐食については手法として確立されつつある。しかしながら、ある潜伏期間の後、急激な腐食進展が起るDおよびE型腐食については未解決課題が多く、鍵となる非破壊検査技術の進展が望まれるところである。

(技監 下郡 一利)